

# ДЕПОЛЯРИЗАЦИОННОЕ ОТНОШЕНИЕ ДЛЯ ТИПИЧНЫХ ФОРМ ЛЕДЯНЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ ПЕРИСТЫХ ОБЛАКОВ

Н.В. Кустова, А.В. Коношонкин, В.А. Шишко,  
Д.Н. Тимофеев, И.В. Ткачев, А.Г. Боровой

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия*

Москва – 2022

# Введение

В начале лидарных исследований атмосферных облаков деполяризационное отношение использовалось для отличия капельных облаков от кристаллических [1]. Позже были попытки определить форму ледяных кристаллических частиц по величине деполяризационного отношения [2]. В настоящее время деполяризационное отношение используется как один из важных параметров в различных численных моделях для восстановления микрофизики перистых облаков по данным, полученным совместными измерениями лидарами, радиометрами и радарами [3].

---

[1] Sassen, K. The polarization lidar technique for cloud research: A review and current assessment. *B. Am. Meteorol. Soc.* 1991, 72, 1848–1866.

[2] Noel, V.; Chepfer, H.; Ledanois, G.; Delaval, A.; Flamant, P.H. Classification of particle effective shape ratios in cirrus clouds based on the lidar depolarization ratio. *Appl. Opt.* 2002, 41(21), 4245–4257.

[3] Wang, Z.E.; Sassen, K. Cirrus cloud microphysical property retrieval using lidar and radar measurements. Part II: Midlatitude cirrus microphysical and radiative properties. *J. Atmos. Sci.* 2002, 59, 2291–2302.

# Матрица рассеяния и деполяризационное отношение

$$\mathbf{I}(\theta, \varphi) = \mathbf{M}(\theta, \varphi)\mathbf{I}_0$$

Для хаотически ориентированных частиц матрица рассеяния в направлении назад

$$\mathbf{M}(\pi) = \begin{pmatrix} M_{11} & 0 & 0 & M_{14} \\ 0 & M_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -M_{22} & 0 \\ M_{41} & 0 & 0 & M_{11} - 2M_{22} \end{pmatrix}$$

В случае линейно поляризованного падающего света

$$\mathbf{I}_0 = (1, 1, 0, 0)^T$$

рассеянный в направлении назад  $\theta = \pi$  свет характеризуется

$$\mathbf{I}_\pi = (I_\pi, Q_\pi, U_\pi, V_\pi)^T = (M_{11}, M_{22}, 0, 0)^T, \text{ где } M_{11} = I_\parallel + I_\perp, M_{22} = Q_\pi = I_\parallel - I_\perp$$

Деполяризационное отношение

$$\delta = \frac{I_\perp}{I_\parallel} = \frac{M_{11} - M_{22}}{M_{11} + M_{22}}$$

# Зависимость деполяризационного отношения от размера кристаллов

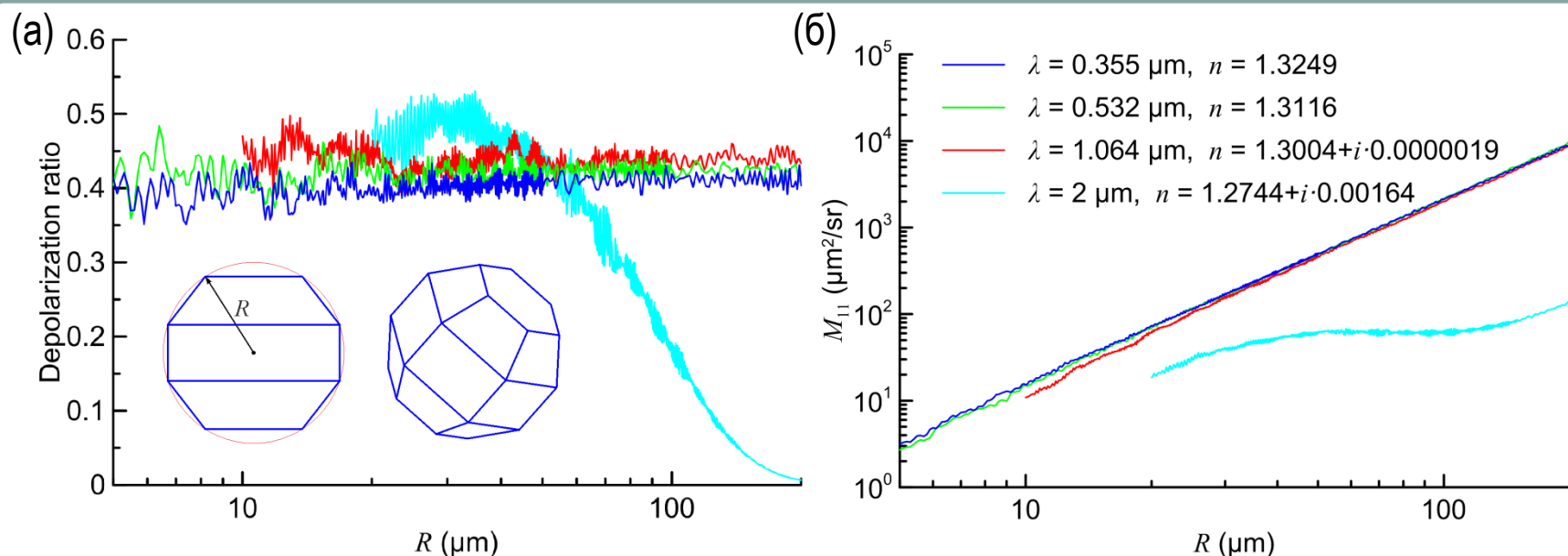


Рис. 1. Деполяризационное отношение  $\delta$  (а) и сечение обратного рассеяния  $M_{11}$  (б) для дроксталлов.

Основная особенность, наблюдаемая на рисунке 1а, заключается в том, что  $\delta$  для больших размеров частиц слабо зависит от их размера. Однако это свойство справедливо только для прозрачных частиц, т. е. если поглощение света, определяемое мнимой частью показателя преломления  $n$ , пренебрежимо мало. В противном случае поглощение приводит к быстрому уменьшению как  $\delta$ , так и  $M_{11}$ , что показано на рисунке 1 для длины волны 2 микрона.

Для пояснения результатов, показанных на рисунке 1, мы рассчитали матрицу рассеяния для дрокстала с некоторыми произвольными значениями показателя преломления. Результаты показаны на рисунке 2.

# Зависимость деполяризационного отношения от размера кристаллов

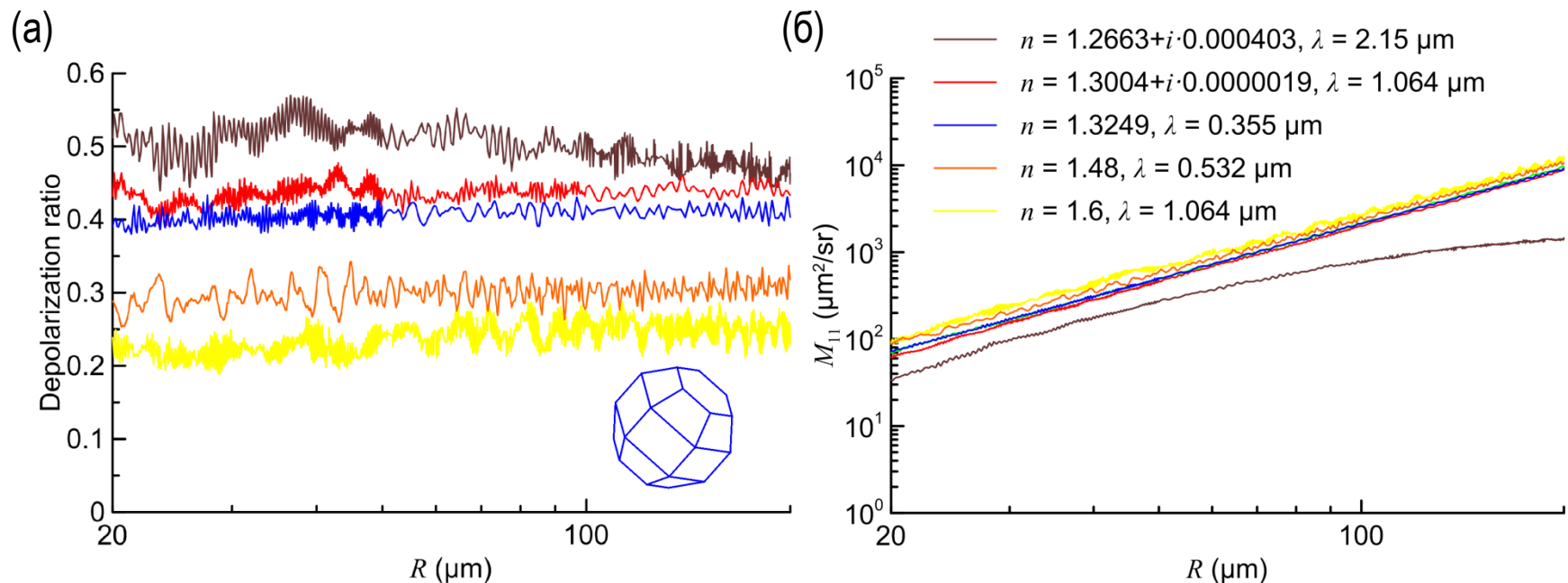
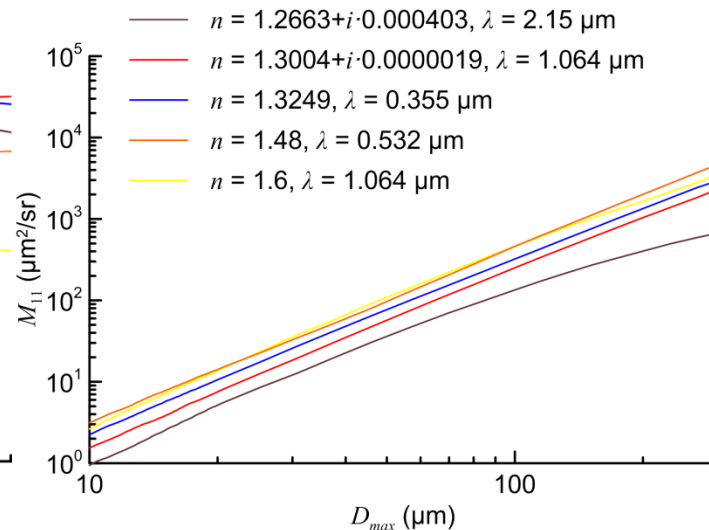
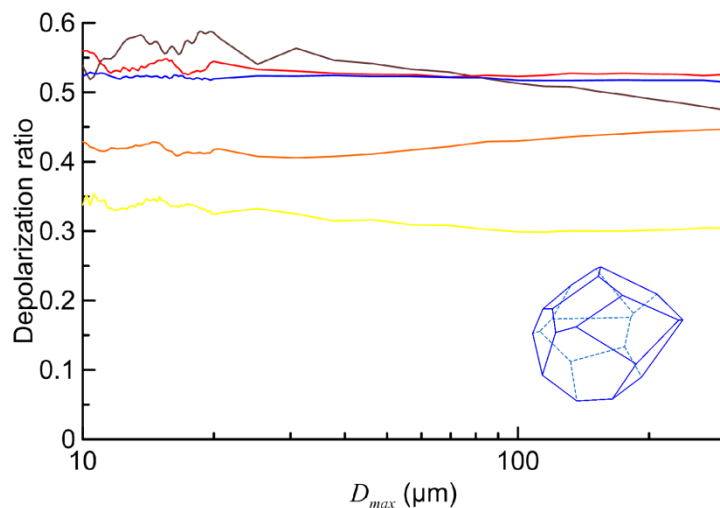
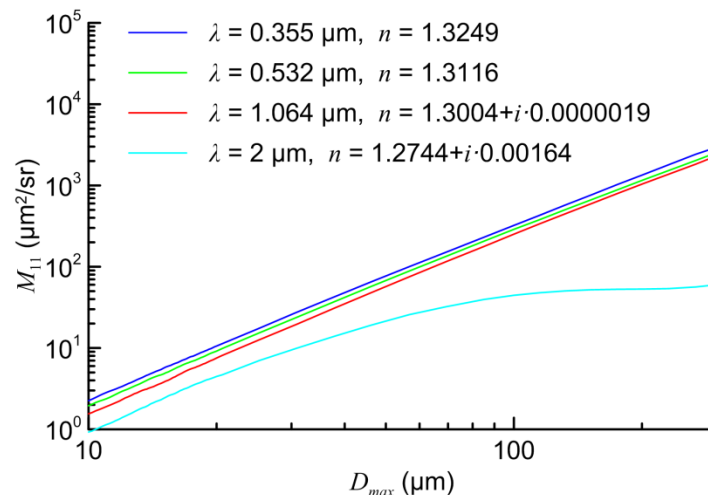
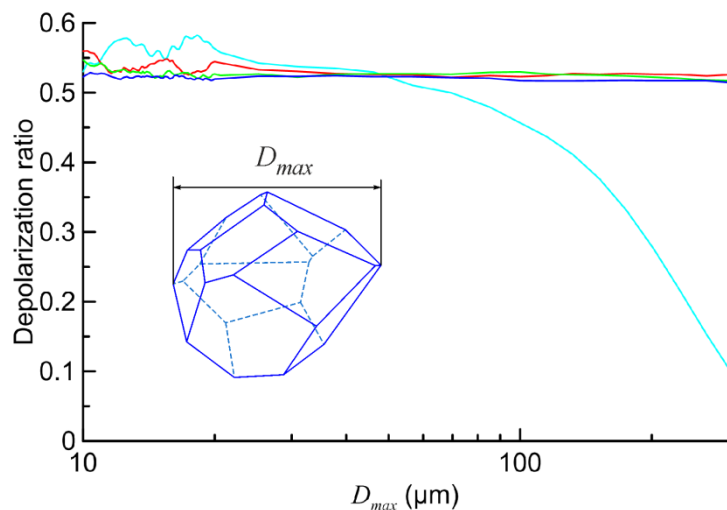


Рис. 2. Деполяризационное отношение  $\delta$  (а) и сечение обратного рассеяния  $M_{11}$  (б) для дроксталлов с различным коэффициентом преломления.

На рисунке 2а мы видим прежние закономерности. А именно, деполяризационные отношения  $\delta$  являются функциями со слабыми флуктуациями около констант. Причем эти константы определяются действительной частью показателя преломления. Таким образом, мы получаем два важных вывода. Во-первых,  $\delta$  для прозрачных кристаллов приближается к некоторому постоянному значению, если размер кристалла увеличивается. Во-вторых, эта константа уменьшается с увеличением показателя преломления.



# Зависимость деполяризационного отношения от размера кристаллов



Выводы, полученные для дроксталла, подтверждаются нашими расчетами для кристалла в форме произвольного многогранника, представленными на данном слайде.

# Деполяризионное отношение для гексагональных столбиков и пластинок

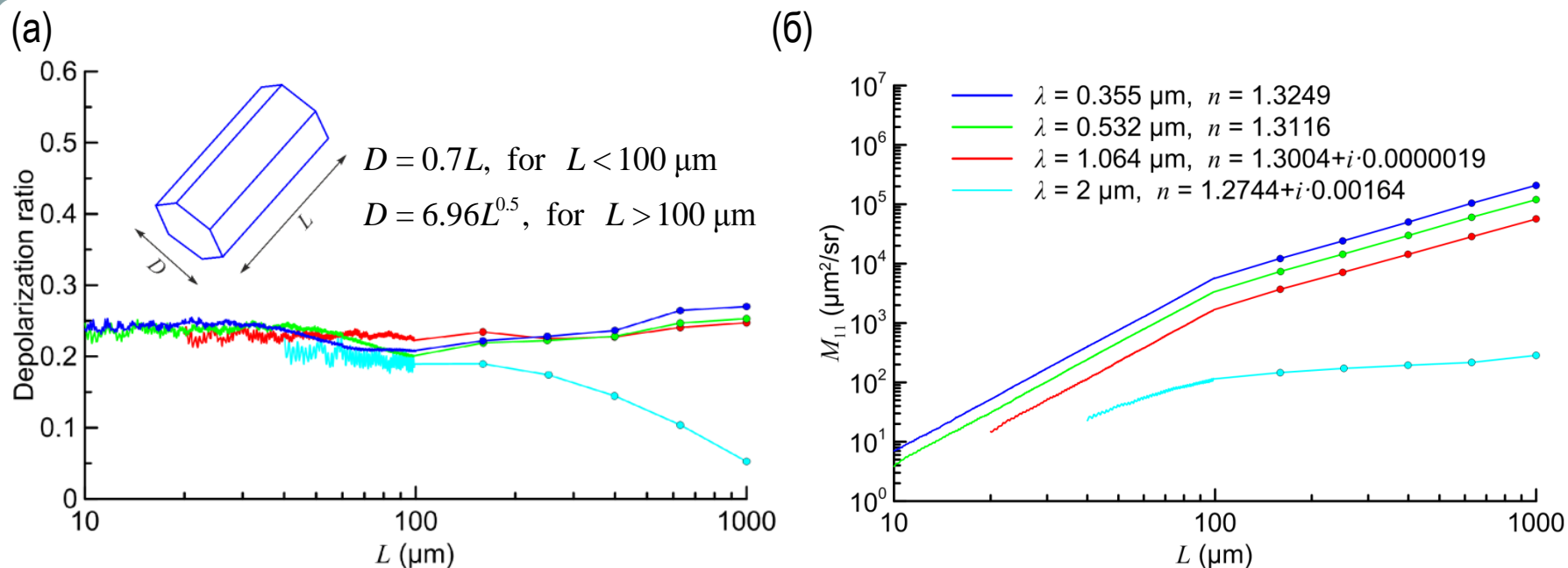


Рис. 3. Деполяризионное отношение  $\delta$  (а) и сечение обратного рассеяния  $M_{11}$  (б) для гексагональных столбиков.

Результаты наших расчетов для случайно ориентированных гексагональных ледяных столбиков и пластинок показаны на рисунках 3 и 4. Известно, что обратно рассеянный свет флуктуирует из-за разницы фаз между рассеянными пучками света. Эти флуктуации сохраняются и после усреднения по ориентациям кристаллов, что показано на рис. 3а при  $L < 100$  микрон. Для столбиков с  $L > 100$  микрон такие флуктуации были сглажены процедурой скользящего среднего.

# Деполяризационное отношение для гексагональных столбиков и пластинок

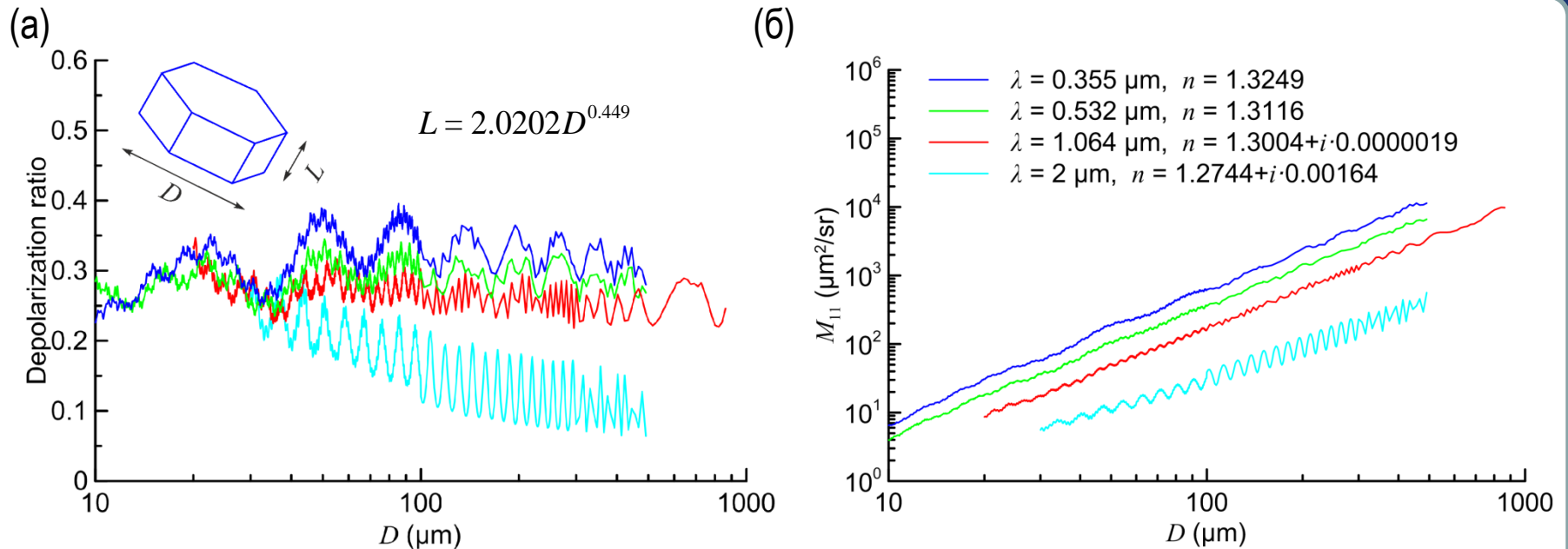


Рис. 4. Деполяризационное отношение  $\delta$  (а) и сечение обратного рассеяния  $M_{11}$  (б) для гексагональных пластинок.

Случай гексагональных пластинок, представленный на рисунке 4, приводит к более сложным результатам. Здесь главная особенность, наблюдаемая на рис. 4а, заключается в том, что к крупномасштабным флуктуациям добавляются мелкомасштабные флуктуации, вызванные интерференцией. Эти крупномасштабные флуктуации деполяризационного отношения на рис. 4а сопровождаются такими же крупномасштабными флуктуациями сечения обратного рассеяния на рис. 4б.



## Выводы

В данной работе мы представили результаты численных расчетов деполяризационного отношения и сечения обратного рассеяния для типичных форм ледяных кристаллических частиц перистых облаков и лидарных длин волн.

Преимуществом этих расчетов является то, что они справедливы для больших размеров кристаллов до 1000 микрон. Такие данные важны для разработки алгоритмов интерпретации лидарных сигналов космических лидаров, таких как CALIPSO, EarthCARE и других.

Также получена физическая интерпретация расчетных данных. Мы показали, что деполяризационное отношение для прозрачных кристаллов льда приближается к постоянному значению для больших размеров кристаллов. Это свойство можно использовать для определения формы кристаллов на основе лидарных измерений. Если излучение лидара поглощается кристаллами льда на некоторых длинах волн, деполяризационное отношение уменьшается. Это факт может быть использован для восстановления размеров кристаллических частиц.